بررسی تغییر مکان افقی شمع‌های بلند تحت اثر بار جانبی در خاک ماسه‌ای★

جواد کشاورز [۱]		جعفر بلوری بزاز [۲]

چکیده *در بسیاری از سازه‌ها، بارهای جانبی بالایی نسبت به بارهای ثقلی به پی یک سازه تحمیل می‌شود. شمع‌های این‌گونه سازه‌ها را که تحت اثر بارهای جانبی قابل توجهی قرار می‌گیرند، می‌توان به دو گروه شمع‌های بلند و کوتاه تقسیم نمود. معمولاً تخمین ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی برای شمع‌های کوتاه براساس حداکثر ظرفیت باربری و برای شمع‌های بلند براساس تغییر مکان افقی مجاز می‌باشد. در تحقیق آزمایشگاهی حاضر برای بررسی رفتار شمع تحت اثر بار جانبی، از لوله‌های فلزی به‌عنوان شمع در آزمایشگاه استفاده شده است. به‌منظور تعیین ظرفیت باربری، بار جانبی به شمع‌های فلزی مدفون در خاک ماسه‌ای اعمال شده است. با انجام آزمون‌های گوناگون رفتار شمع‌های بلند به لحاظ تغییر طول و قطر شمع مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی با نظریهٔ ضریب واکنش بستر، نظریهٔ الاستیک و نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر مورد مقایسه قرار گرفته است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر برای تخمین مقدار جابه‌جایی افقی شمع و نیز تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع نسبت به دیگر تئوری‌های ارائه شده مناسب‌تر می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی شمع‌های بلند; بار جانبی; تغییر مکان افقی; خاک غیرچسبنده.

Evaluation of Horizontal Displacement of Long Piles Subject to Lateral Loading in Sandy Soil

J. Keshavarz		J. Bolouri Bazaz

Abstract *In many structures, the applied lateral loads are comparable with gravity loads. These types of piles which are subject to high lateral load are usually divided into two categories including long and short piles. The general methods to estimate lateral bearing capacity of short and long piles are based on ultimate bearing capacity and allowable horizontal displacement respectively. In the present research, in order to evaluate lateral bearing capacity of piles subjected to horizontal loads, steel pipes which were embedded in sand soil to simulate piles in the laboratory. A wide range of laboratory tests were performed to investigate the behavior of long piles with different lengths and diameters. The test results were compared with three different theories including Modulus of Subgrade Reaction, Elastic and k_{hmax} approaches. The experimental results reveal that k_{hmax} approach is more suitable for determination of horizontal displacement and also estimation of lateral bearing capacity for long piles.*

Key Words Long piles, Lateral load, Horizontal displacement, Cohesionless soil.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۲/۳۰ می‌باشد.

(۱)دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲)نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. bolouri@um.ac.ir

مقدمه

اغلب شمع‌ها تحت تأثیر بارهای افقی قرار می‌گیرند. در بعضی از سازه‌ها مقدار این بار نسبت به بار قائم ناچیز و قابل صرف نظر کردن است، اما در مواردی شمع‌ها تحت بارهای جانبی قابل توجهی قرار می‌گیرند. شمع پل‌ها، ساختمان‌های بلند، سازه‌های ساحلی و تابلوها علامت کاربرد معمولاً تحت اثر بار جانبی نیز قرار دارند. برای تخمین بار جانبی وارد به شمع روش‌های گوناگونی بیان شده است که به‌طور کلی از دو معیار زیر مشخص می‌شود:

۱. بار جانبی مجاز از تقسیم بار نهایی به ضریب اطمینان.

۲. بار جانبی مجاز براساس تغییر مکان افقی.

به‌طور کلی شمع‌ها به دو دسته شمع‌های بلند و کوتاه تقسیم می‌شوند. ظرفیت باربری شمع‌های کوتاه و شمع‌های بلند به‌ترتیب به مقاومت خاک و مقاومت شمع بستگی دارد [1]. شمع کوتاه تحت اثر بار جانبی همانند یک جسم صلب عمل می‌کند و کل شمع در نقطهٔای دوران می‌کند، در صورتی که شمع کوتاه دارای پی (Fix Head) به‌طور کامل جابه‌جا می‌شود. شمع بلند تحت اثر بار جانبی، بسته به اینکه دارای پی یا بدون پی (Free Head) باشد در آن یک یا دو مفصل ایجاد شده و از نقطهٔ مفصل دوران می‌کند.

برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها روش‌هایی مانند هانسن، برامز، پتراسوویت و اوارد، میرهوف و پراساد ارائه شده است [2-8]. به جز روش برامز بقیه روش‌ها برای شمع‌های کوتاه کاربرد دارند. هم‌چنین برای شمع‌های بلند می‌توان از نظریهٔ ضریب واکنش بستر [9]، نظریهٔ الاستیک [1] و نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر [10] استفاده نمود.

فعالیت‌های دیگر پژوهشگران

بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی زیادی بر روی شمع تحت اثر بار جانبی صورت گرفته که اکثر آنها بر روی شمع‌های کوتاه است، از آن جمله می‌توان به Christensen[11] اشاره نمود. این پژوهشگر شمع‌های چوبی مربعی به بعد ۵۰ میلی‌متر و طول‌های مدفون ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌متر را در مخزنی مربعی به طول یک متر و ارتفاع ۷۰۰ میلی‌متر که از ماسه خشک پر شده تحت اثر بار جانبی قرار داده است. بار جانبی در ارتفاعات گوناگونی نسبت به شمع اعمال شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نظریه‌هانسن بار جانبی شمع‌ها را اندکی دست بالا تخمین می‌زند.

Prasad and Chari [8] شمع‌های لوله‌ای فلزی به قطر ۱۰۲ میلی‌متر و طول ۱۱۳۵ میلی‌متر را در مخزنی به قطر ۱/۸۳ متر و ارتفاع دو متر حاوی خاک ماسه‌ای، قرار داده و پس از اعمال بار جانبی، تغییر مکان افقی و فشار وارد شده به شمع را بررسی کردند. سپس براساس نتایج رابطهٔای برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه ارائه نموده و با مقایسه دیگر روش‌ها، روش پیشنهادی خود را نسبت به دیگر روش‌ها بهتر بیان داشته است. Zhang et al. [12] با درنظر گرفتن نظریهٔهای مختلف، بیان داشته است که تنها در روش پراساد و چری توزیع فشار خاک بر روی شمع درست درنظر گرفته شده است .

Kumar et al. [10] با ارائه حداکثر مدول افقی واکنش بستر و بررسی نتایج آزمایش‌های شمع تحت اثر بار جانبی در اندازهٔ واقعی با نظریهٔهای p-y و مدول واکنش بستر، پیشنهاد نموده است که مهندسان برای پیش‌بینی منحنی نیرو–جابه‌جایی در خاک ماسه‌ای از نظریهٔ حداکثر مدول افقی واکنش بستر استفاده نمایند. دلیل این امر ساده‌تر بودن و بهتر پیش‌بینی نمودن رفتار شمع در این روش است.

Murugan et al. [13] به بررسی نظری شمع تحت اثر بار جانبی در خاک غیر چسبنده پرداخته است و مقایسه‌ای بین ظرفیت باربری به‌دست آمده از آیین‌نامهٔ هند و روش برامز ارائه نموده است. در این تحقیق ظرفیت باربری به‌دست آمده از آیین‌نامهٔ هند به‌صورت قابل توجهی کمتر از روش برامز بیان شده است.

معیارهای رفتاری شمع‌ها

شمع کوتاه در اثر بار جانبی به‌صورت صلب عمل می‌کند و حول نقطهٔای دوران می‌کند در صورتی که شمع بلند در اثر بار جانبی به‌صورت انعطاف‌پذیر عمل می‌کند و در نقطهٔای در طول شمع ایجاد مفصل می‌کند. رفتار شمع کوتاه و بلند بستگی به سختی نسبی سیستم شمع و خاک دارد [14]. برای پیش‌بینی رفتار یک شمع که به‌صورت کوتاه یا بلند عمل می‌کند معیارهای متفاوتی ارائه شده است که در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱ معیارهای شمع بلند و کوتاه

ردیف	مرجع	شمع کوتاه	شمع بلند
۱	[3 و 4]	$L/T \le 2$	$L/T \ge 4$
۲	[1]	$K_r > 10^{-2}$	$K_r < 10^{-2}$
۳	[15]	$L/B<6$	$L/B>6$
٤	[16]	$S_H < 5$	$S_H > 5$
٥	[17]	$L < 1.5\ BK^{0.36}$	$L > 1.5\ BK^{0.36}$
٦	[18]	$L > L_C/3$	$L > L_C$

$$T = (E_P I_P / n_h)^{0.2} \quad (۱)$$

$$K_r = (E_P I_P / E_s B^4) \quad (۲)$$

$$S_H = (L/B)(E_P / E_s)^{0.25} \quad (۳)$$

$$K = (E_P / E_s) \quad (٤)$$

$$L_c = 4.44(E_P I_P / E_s)^{0.25} \quad (٥)$$

در روابط ارائه شده T طول مشخصه می‌باشد که از رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید. مقدار ضریب واکنش بستر که برای محاسبه طول مشخصه نیاز است در جدول (۲) برای ماسهٔخشک ارائه شده است. هم‌چنین پارامترهای انعطاف پذیری (S_H و K_r)، نسبت سختی (K) و طول بحرانی (L_c) به‌ترتیب از روابط (۲)، (۳)، (٤) و (٥) به‌دست می‌آیند. در این روابط، L طول مدفون شمع (m)، B پهنای شمع (m)، n_h ضریب واکنش بستر (kN/m³)، E_P ضریب یانگ شمع (kPa)، I_P ممان اینرسی شمع (m⁴) و E_S ضریب یانگ خاک (kPa) می‌باشد.

جدول ۲ محدودهٔ ضریب افقی واکنش بستر [19]

n_h (kN/m³)		
ماسهٔ متراکم	ماسهٔ نیمه متراکم	ماسهٔ شل
20000	7700	2600

تغییر مکان جانبی شمع بلند در خاک دانه‌ای

نظریه‌های متعددی برای محاسبهٔ تغییر مکان جانبی شمع بلند در خاک دانه‌ای ارائه شده است. نظریهٔ ضریب واکنش بستر، نظریهٔ الاستیک و نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته شده در ادامه بیان شده است.

نظریهٔ ضریب واکنش بستر. این نظریه با همانندسازی خاک با یک سری فنرهای الاستیک خطی می‌تواند تغییرات ضریب واکنش بستر را (که وابسته به ابعاد و تغییر شکل‌ها است) در لایه‌های مختلف در نظر بگیرد. بارهای جانبی وارد به شمع مانند یک تیر روی پی الاستیک درنظر گرفته می‌شود و خاک زیر تیر با یک سری فنر جایگزین می‌شود. سختی این فنرها k_h ضریب افقی واکنش بستر نامیده می‌شود.

$$k_h = \frac{p}{y} \quad (٦)$$

رفتار ارتجاعی شمع با معادله دیفرانسیل زیر قابل بیان است:

$$EI\frac{d^4y}{dx^4} + p = 0$$

و یا

$$\frac{d^4y}{dx^4} + \frac{k_h y}{EI} = 0 \quad (۷)$$

در این رابطه‌ها p ، y ، x و EI به‌ترتیب فشار در واحد طول شمع، جابه‌جایی افقی، عمق و سختی آن می‌باشد. ضریب واکنش بستر ارائه شده در جدول (۲) کلی است و برای تعیین دقیق‌تر آن می‌توان از رابطهٔ (۹) استفاده کرد [16].

$$n_h = 220.286 \frac{Q}{y_T}$$ (۹)

در این رابطهٔ Q نیروی افقی (kN) و y_T جابه‌جایی افقی در محل اعمال نیرو (m) می‌باشد.

با استفاده از اصل برهم‌نهی، تأثیر بار جانبی و لنگر بر روی (y_A و y_B) به‌طور جداگانه قابل محاسبه‌اند:

$$y_X = y_A + y_B$$ (۱۰)

بـا اسـتفاده از رابطـهٔ (۱۰) و بـدون بعدسـازی پارامترها خواهیم داشت:

$$\frac{y_A EI}{Q_g T^3} = A_y$$ (۱۱)

$$\frac{y_B EI}{M_g T^2} = B_y$$ (۱۲)

$$\frac{x}{T} = Z$$ (۱۳)

$$\frac{L}{T} = Z_{max}$$ (۱۴)

$$\frac{k_h T^4}{EI} = \varphi(x)$$ (۱۵)

A_y ضریب تغییر شکل برای بار جانبی، B_y ضریب تغییر شکل برای لنگر، Z ضـریب عمـق، Z_{max} حـداکثر ضریب عمق، φ(x) تـابع ضـریب خـاک، Q_g و M_g بـه ترتیب نیرو و لنگر اعمالی بـه سـر شـمع مـی‌باشـد. بـا جای‌گذاری روابط (۱۱) و (۱۲) در رابطهٔ (۱۰) داریم:

$$y_x = A_y \frac{Q_g T^3}{EI} + B_y \frac{M_g T^2}{EI}$$ (۱۶)

با حل معادلات فوق بـا اسـتفاده از روش تفاضـل محدود برای عمق‌های، مقدار ضریب A_y و B_y در سطح (z=0) به‌ترتیب برابر با ۲/۴۳۵ و ۱/۶۲۳ می‌باشد [9].

نظریهٔ الاستیک. اسـاس نظریـهٔ الاسـتیک و ضـریب واکنش بستر یکسان است اما فرض‌ها و روش حل آنهـا با یکدیگر متفاوت می‌باشـد. در ایـن روش خـاک یـک محیط الاستیک ایـده‌آل فـرض مـی‌گـردد و شـمع یـک مستطیل باریک با سختی خمشی ثابت EI در نظرگرفتـه می‌شود. برای ساده‌سازی تحلیل، تنش برشی بین خـاک و جدارهٔ شمع در نظر گرفته نمـی‌شـود. ایـن روش کـه برای خاک‌هایی با لایه‌های متفاوت قابل اسـتفاده اسـت نیازمند به تعیین پارامترهای دقیق خاک محل مـی‌باشـد. در واقع هر چه داده‌های ورودی دقیق‌تـر باشـند، پاسـخ مناسب‌تری از این روش به‌دست می‌آید. با فـرض ایـن که ضریب خاک به‌طور خطی با عمق افـزایش مـی‌یابـد می‌توان آن را به‌صورت تابعی از عمق نشان داد.

$$E_s = N_h x$$ (۱۷)

در این رابطهٔ N_h نرخ افزایش E_s با عمـق (مشـابه با n_h در نظریهٔ ضریب بستر) می‌باشد. با فـرض یکسـان بودن نرخ افزایش E_s و k_h با عمق، N_h=n_h خواهد بـود. مقدار جابه‌جایی در سطح زمین از رابطهٔ (۱۸) بـه‌دسـت می‌آید. مقادیر I'_{ph} و I'_{pM} و F'_p ضرایبی هستند کـه بـا داشتن طول، قطر، ممان اینرسی و ضریب یانگ شمع از نمودارهای ارائه شده قابل استخراج می‌باشد [1].

$$y_g = \frac{Q_g}{N_h L^2}(I'_{ph} + \frac{e}{L} I'_{pM}) / F'_p$$ (۱۸)

در این رابطهٔ y_g جابه‌جایی شمع در سـطح زمـین، Q_g و e به‌ترتیب نیروی افقی وارد به شمع و فاصـله آن از سطح زمین می‌باشد.

نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر. مطالعـه بـر روی ضریب برشی خاک نشان می‌دهد که ایـن ضـریب وابسته به کرنش است [20]. ضریب افقی واکنش بسـتر مانند ضریب برشی تابعی از کـرنش اسـت. محققـان بـا مطالعه واکنش شمع در مقیاس واقعی در برابر بار جانبی و رسم منحنـی‌هـای k_h در برابـر کـرنش دریافتنـد کـه تقریباً همه منحنی‌ها در کرنش ۰/۰۰۲ مجانب می‌شـوند [21-23]. بر این اساس مقدار k_h در کرنش ε=0.002 را k_{hmax} می‌نامند. با توجه به این که تمام منحنی‌های بدون بعد شده ضریب افقی واکنش بستر در برابر کرنش شبیه به هم هستند یک تـابع تـوانی بـه شـکل زیـر تعریـف می‌شود.

$$\frac{k_h}{k_{h\,max}} = 0.052\varepsilon^{-0.48}$$ (۱۹)

با در نظر گرفتن تغییر شکل مجاز و با استفاده از رابطهٔ ۲۰ می‌توان مقدار کرنش را در خاک می‌توان محاسبه کرد [24]. هم‌چنین حد بالا و پایین k_{hmax} با استفاده از جدول (۳) قابل تعیین است.

$$\varepsilon = \frac{y}{1.667B} \quad (۲۰)$$

جدول ۳ مقادیر پیشنهادی k_{hmax} [23]

دانسیته نسبی	k_{hmax} (ksf)
متراکم	830-1660
نیمه متراکم	450-950
سست	85-225

اکنون با به‌کارگیری رابطهٔ (۲۱) مقدار k_h به‌دست می‌آید. با قرار دادن $n_h=k_h$ و استفاده از رابطهٔ (۱) برای تعیین مقدار T، مقدار Q_g قابل محاسبه است.

$$Q_g = \frac{yEI}{A_y T^3} \quad (۲۱)$$

بر پایهٔ تحلیل‌های انجام شده توسط متلاک و ریس [9] ضریب جابه‌جایی در سطح زمین $A_y=2.435$ است. در حقیقت با داشتن حد بالا و پایین k_{hmax} برای یک تغییر شکل مجاز دو مقدار برای Q_g محاسبه می‌شود.

اهداف و روش تحقیق

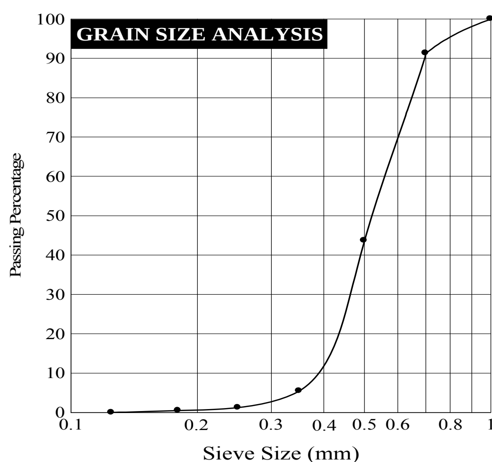
اغلب تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر روی شمع‌های کوتاه بوده است و شمع‌های بلند کمتر به شکل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر سعی شده با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، ظرفیت باربری و رفتار شمع‌های بلند تحت اثر بار جانبی بررسی گردد. هم‌چنین تعیین نقطهٔ پلاستیک (مفصل) در شمع‌ها و نیز اثر پارامترهای مؤثر مانند طول و قطر شمع نیز مورد تحقیق واقع شده‌اند.

در این تحقیق با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، شمع‌های بلند تحت اثر بار جانبی قرار گرفته و تغییر شکل آنها اندازه‌گیری و با نظریه‌های مختلف که در بخش‌های قبل ارائه شده مورد مقایسه قرار گرفته است. مصالح و تجهیزات مورد استفاده و نحوهٔ انجام آزمایش در بندهای ٦، ٧ و ٨ شرح داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده می‌توان انتخاب روش مناسب و کاربردی را به مهندسان توصیه نمود.

خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده در این تحقیق، ماسهٔ فیروزکوه بوده است که دانه‌بندی آن در شکل (۱) نمایش داده شده است. سایر مشخصات این ماسه در جدول (٤) ارائه داده شده است. زاویهٔ اصطکاک و ضریب ارتجاعی آن به‌ترتیب از آزمایش برش مستقیم و آزمایش سه‌محوری [25] به‌دست آمده است.



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده

جدول ٤ مشخصات خاک مورد آزمایش

وزن مخصوص (kN/m^3)	تراکم نسبی (٪)	φ (درجه)	E_s (MPa)
13.8	28±1	33	16.4
15	91±1	41.5	40

دستگاه و مصالح مورد آزمایش

در تحقیق حاضر برای بررسی رفتار شمع تحت اثر بار جانبی مجموعه دستگاهی طراحی و ساخته شد که جزئیات آن در زیر ارائه شده است.

شمع مورد آزمایش. در این تحقیق از لوله‌های گالوانیزه و آلمینیومی با طول مدفون ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر به‌عنوان شمع استفاده شده است. مشخصات لوله‌های مورد استفاده پس از انجام‌آزمایش کشش بر روی آنها در جدول(۵) درج شده است. شمع‌های شمارۀ ۱ و ۲ از جنس گالوانیزه و شمع‌های شمارۀ ۳ و ٤ آلومینیومی می‌باشند.

جدول ۵ مشخصات شمع‌های مدل شده در آزمایشگاه

شماره شمع	وزن (kg/m)	ضریب یانگ (GPa)	ضخامت دیواره (mm)	قطر خارجی (mm)
1	1.00	196	2.4	21.7
2	1.31	196	2.4	27
3	0.25	68	1.9	22
4	0.36	68	1.4	24.8

مخزن خاک. ابعاد مخزن مورد استفاده بر پایۀ تأثیر منطقۀ تنش باید ۱۰ برابر قطر شمع در جهت اعمال نیرو برای شمع تحت اثر بارجانبی در حالت استاتیکی در نظر گرفته شود [1]. بدین منظور با توجه به شمع‌های مورد استفاده از یک مخزن دایروی به قطر ۷۰۰ میلی‌متر و ارتفاع یک متر استفاده شده است. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی افقی شمع در عمق خاک، سوراخ‌های کوچکی در فواصل ۲۰۰ میلی‌متری بر روی مخزن در جهت و خلاف جهت اعمال نیرو ایجاد شده است.

نحوۀ اعمال نیروی افقی. برای اعمال نیروی افقی قرقره‌ای در ارتفاع ۲۷۰ میلی‌متری از سطح خاک ثابت شده است. سیم مفتولی از یک طرف به شمع و از طرف دیگر با عبور از روی قرقره به مخزن کوچکی متصل شده است. در داخل مخزن کوچک وزنه قرار می‌گیرد و نیروی استاتیکی به شمع اعمال می‌شود. برای کنترل دقت و صحت مقدار بار وارد، برای چند آزمایش بین سیم مفتول و شمع نیروسنج قرار داده شده است و بدین وسیله مقدار نیروی اعمالی کنترل شده است [٢٦].

نحوۀ اندازه‌گیری جابه‌جای افقی. جابه‌جایی افقی در سطح خاک با گیج‌الکتریکی اندازه‌گیری شده است. برای مقدار جابه‌جایی افقی شمع در عمق خاک، سیم‌های نازکی در فواصل ۲۰۰ میلی‌متری به شمع‌ها متصل می‌شوند. این سیم‌ها با عبور از سوراخ‌های ایجاد شده بر روی مخزن خاک در جهت و خلاف جهت اعمال نیرو به گیج‌های مکانیکی متصل می‌شوند. در هر مرحله با افزایش بار وارده، مقدار جابه‌جایی توسط گیج‌ها ثبت می‌شود و در نتیجه در هر بارگذاری وضعیت شمع مشخص می‌گردد [٢٦].

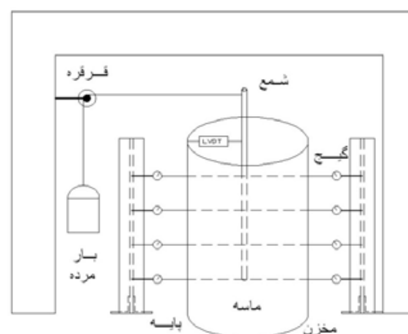
نحوۀ انجام آزمایش

در ابتدا سیم‌های نازک برای اندازه‌گیری جابه‌جایی افقی در فواصل منظم به شمع متصل می‌شوند و سپس شمع در داخل مخزن قرار می‌گیرد. خاک‌ریزی داخل مخزن تا رسیدن به تراز سوراخ‌های ایجاد شده بر روی مخزن انجام می‌شود. هنگام رسیدن به تراز سوراخ ابتدا سیم‌های نازک متصل به شمع از داخل سوراخ مخزن به سمت گیج‌هایی که بر روی پایه‌ای در کنار مخزن ثابت شده‌اند، هدایت می‌شوند. سیم‌ها مقداری کشیده می‌شوند و سپس به گیج‌ها متصل می‌شوند. این سیم‌ها بسیار نازک‌اند و در صورت کوچک‌ترین ایجاد اصطکاک یا درگیری پاره می‌شوند. بعد از اتمام خاکریزی سیم مفتولی در ارتفاع ۲۷۰ میلی‌متری از سطح خاک به شمع متصل می‌شود. گیج الکتریکی در سطح خاک مماس با بدنه شمع قرار می‌گیرد. با قرار دادن وزنه در داخل مخزن کوچک به شمع نیروی جانبی اعمال می‌شود و شمع حول نقطۀای دوران و یا حول نقطۀای در طول شمع ایجاد مفصل می‌کند. در نتیجه سیم‌های متصل به شمع کشیده شده و مقدار جابه‌جایی شمع توسط گیج‌ها نمایش داده می‌شود. در هر بارگذاری مقدار نیرو و جابه‌جایی در اعماق متفاوت ثبت می‌شود. تصویر دستگاه آزمایش و هم‌چنین طرح شماتیک آن در شکل (۲) نمایش داده شده است [٢٦].

برنامهٔ آزمایش‌های انجام شده

هر یک از آزمایش‌های انجام‌شده با یک شماره منحصر به فرد و به‌صورت Ga-L*D* و یا Al-L*D* مشخص شده است. حروف Ga نشان دهنده گالوانیزه بودن و Al نشان دهندهٔ آلمینیومی بودن شمع مورد استفاده است. حرف L بیانگر طول شمع و عدد بعد از آن طول شمع (cm) می‌باشد. حرف D بیانگر قطر خارجی شمع و عدد بعد از آن قطر شمع (mm) می‌باشد. به‌عنوان مثال منظور از Ga-L40-D21.7 شمع از جنس گالوانیزه با طول ٤٠ سانتی متر و قطر خارجی ۲۱/۷ میلی‌متر می‌باشد. آزمایش‌ها در ماسه با دو وزن مخصوص ($13.8\ kN/m^3$ و $15\ kN/m^3$) متفاوت انجام شده است. برای بررسی تغییر مکان افقی شمع‌های بلند و کوتاه با توجه به سختی شمع و منطقه تأثیر تنش از شش لولهٔ آلمینیومی و شش لولهٔ گالوانیزه با طول‌های ٤٠٠، ٦٠٠ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطرهای خارجی متفاوت (که لیست آنها در جدول شمارهٔ (۷) قابل مشاهده است) استفاده شده است.





شکل ۲ تصویر و طرح شماتیک دستگاه آزمایش

جنس شمع و نیز قطر و طول آن با توجه به سختی خاک مورد استفاده در آزمایشگاه، به گونه‌ای انتخاب شده که تغییرمکان‌های ایجاد شده متناسب با واقعیت باشد. در همین ارتباط، نسبت طول به قطر در این تحقیق بین ١۵ تا ٤٠ در نظر گرفته شده است.

نتایج آزمایش‌ها

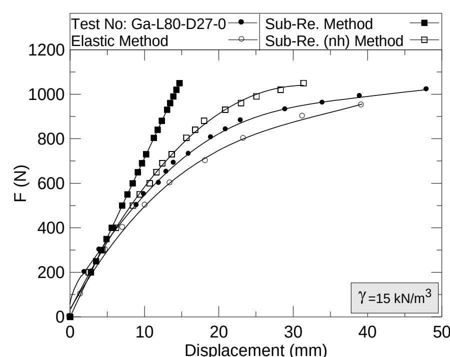
نمودارهای نیرو – جابه‌جایی شمع‌های بلند با استفاده از نظریه‌های بیان شده به‌دست آمده است. برای تعیین ضریب واکنش بستر از رابطهٔ (١٦) استفاده شده است. در این رابطهٔ برای داشتن پارامتر طول مشخص نیاز به تعیین ضریب افقی واکنش بستر می‌باشد. دو روش برای به‌دست آوردن ضریب افقی واکنش بستر به‌کار برده شده است. روش اول استفاده از جدول (۲) می‌باشد. معمولاً زمانی که اطلاعات دقیقی در دست نباشد از این جدول برای خاک‌های ماسه‌ای استفاده می‌شود. روش دیگر استفاده از رابطهٔ (۹) می‌باشد. با استفاده از این رابطهٔ مقدار ضریب افقی واکنش بستر با توجه به مقدار بار اعمالی و جابه‌جایی شمع تغییر می‌نماید. نمودارهای مربوط به نظریهٔ ضریب واکنش بستر که ضریب افقی واکنش بستر آنها از جدول (۲) به‌دست آمده است و به بیان دیگر ثابت فرض شده با نام .Sub-Re مشخص شده است. هم‌چنین نمودارهای مربوط به این نظریهٔ که ضریب افقی واکنش بستر آنها از رابطهٔ (۹) به‌دست آمده با نام Sub-Re.(nh) درج شده است. برای نمودارهای مربوط به نظریهٔ الاستیک از نام Elastic و برای نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر از نام K_{hmax} استفاده شده است.

تغییر مکان جانبی شمع‌های گالوانیزه‌ای. در شکل (۳) نتایج آزمایشگاهی شمع گالوانیزه با قطر ۲۷ میلی‌متر که تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص ١۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در آزمایشگاه قرار گرفته است با تئوری‌های ضریب واکنش بستر و نظریهٔ الاستیک مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که دیده می‌شود اگر در نظریهٔ ضریب واکنش بستر مقدار ضریب

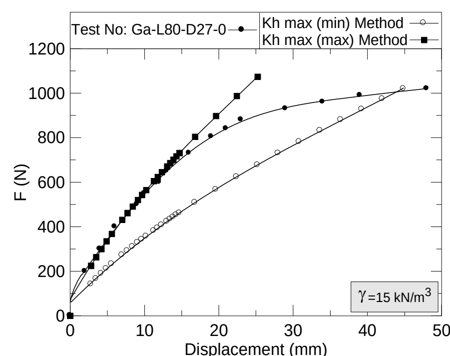
افقی واکنش بستر ثابت فرض شود و یا به عبارتی مقدار آن از جدول (۲) انتخاب شود، با افزایش نیرو مقدار جابه‌جایی به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد که بدیهی است این امر با واقعیت تطابق ندارد. در واقع با افزایش نیروی جانبی به مرحله‌ای می‌رسد که با اندک افزایش در نیروی جانبی مقدار جابه‌جایی زیادی حاصل می‌شود.

با داشتن اطلاعات دقیق‌تر و استفاده از رابطهٔ (۹) برای به‌دست آوردن ضریب افقی واکنش بستر می‌توان نمودار دقیق‌تری نسبت به واقعیت به‌دست آورد. ملاحظه می‌شود نظریهٔ الاستیک در این شکل تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

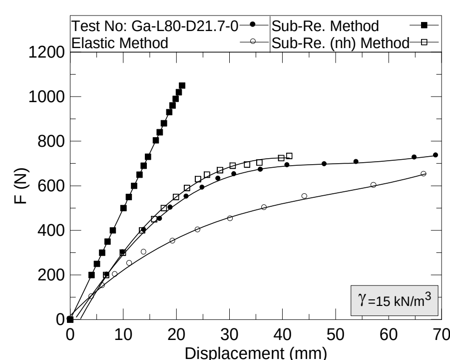
در شکل (٤) نمودار شمع گالوانیزه‌ای در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در کنار نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر قرار گرفته است. در نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر با استفاده از حد بالا و پایین ضریب افقی واکنش بستر که در جدول (٤) درج شده است، محدودهٔ نمودار شمع‌های بلند تحت اثر بار جانبی را مشخص می‌نماید. در شکل (٤) مشاهده می‌شود نمودار آزمایشگاهی تقریباً در محدوده تعیین شده قرار گرفته است. ابتدای نمودار آزمایشگاهی بر روی مرز بالایی واقع شده است و سپس شیب آن کاهش می‌یابد و به سرعت افقی می‌شود اما نمودارهای حداکثر ضریب افقی واکنش بستر با شیب ملایمی ادامه می‌یابند.



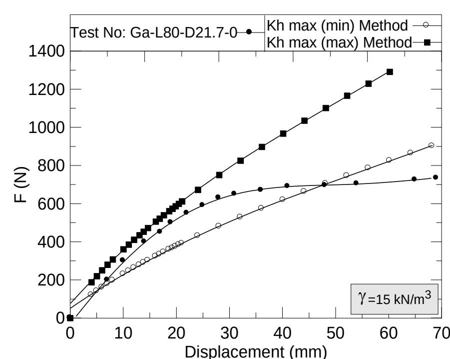
شکل ۳ مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی با نظریهٔ الاستیک و ضریب افقی واکنش بستر



شکل ٤ مقایسه *نتایج* آزمایشگاهی با نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر



شکل ٥ مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی با نظریهٔ الاستیک و ضریب افقی واکنش بستر

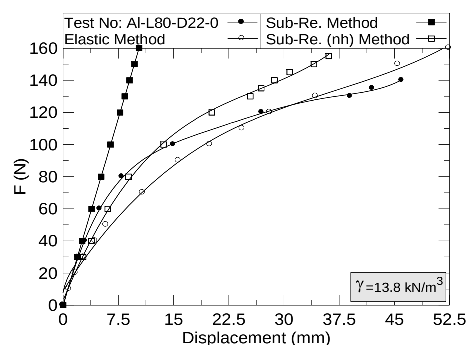


شکل ٦ مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی با نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر

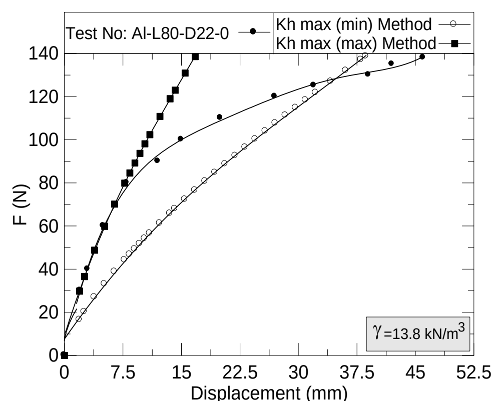
در اشکال (٥) و (٦) شمع گالوانیزه‌ای ذکر شده با قطر ۲۱/۷ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب با تئوری‌های بیان‌شده مورد مقایسه قرار گرفته شده است. در شکل (٥) مشاهده

می‌شود نظریهٔ الاستیک تطابق خوبی در مقابل نمودار آزمایشگاهی از خود نشان نمی‌دهد. در شکل (٦) نمودار آزمایشگاهی در محدودهٔ مشخص شده قرار گرفته است که البته انتهای نمودار آزمایشگاهی از این محدوده خارج شده است. ملاحظه می‌شود در نیروی ۷۰۰ نیوتنی تقریباً نمودار آزمایشگاهی به‌صورت افقی شده است که بیانگر آن است شمع پس از اعمال این نیرو توانایی تحمل کوچک‌ترین باری را ندارد.

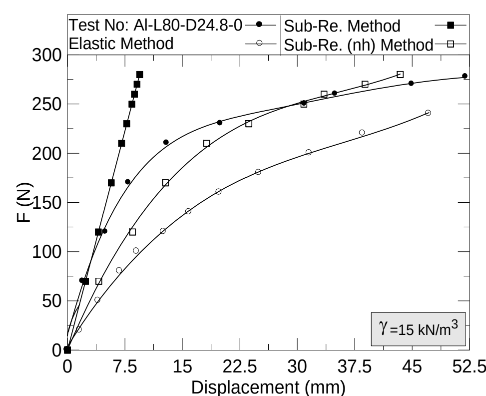
تغییر مکان جانبی شمع‌های آلومینیومی. در شکل (۷) نمودار جابه‌جایی شمع آلمینیومی با قطر ۲۲ میلی‌متر تحت اثر بار جانبی در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب با نظریهٔ ضریب افقی واکنش بستر و نظریهٔ الاستیک مقایسه شده است. در ابتدای این نمودار ملاحظه می‌شود تمامی تئوری‌های به‌کار برده شده تطابق خوبی با نمودار آزمایشگاهی دارند. نمودار جابه‌جایی افقی این شمع با نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر نیز مقایسه شده است که در شکل (۸) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است، شمع بلند با طول مدفون ٦۰۰ میلی‌متر نیز رفتاری همانند شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر دارد. نمودار جابه‌جایی افقی شمع آلمینیومی در سطح خاک با قطر ۲٤/۸ در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.



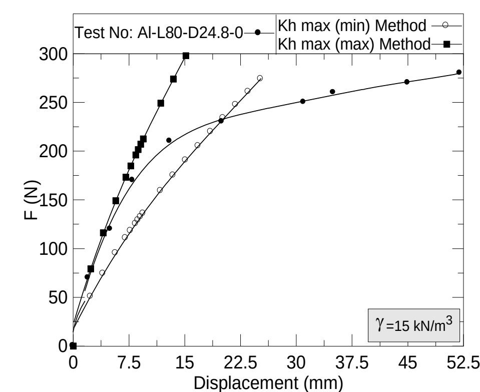
شکل ۷ مقایسهٔ نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی با نظریهٔ الاستیک و ضریب افقی واکنش بستر



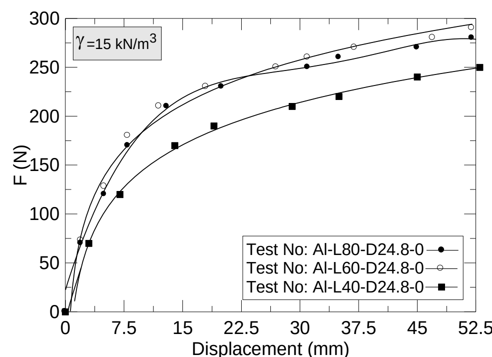
شکل ۸ مقایسهٔ نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی با نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر



شکل ۹ مقایسهٔ نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک با نظریهٔ الاستیک و ضریب افقی واکنش بستر



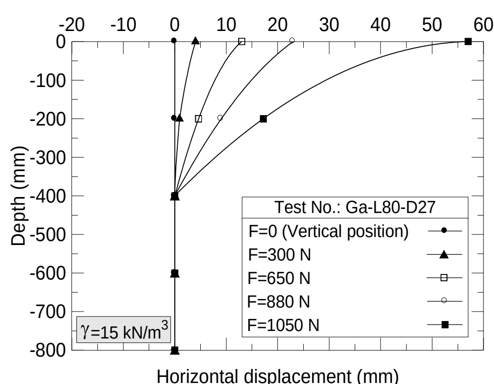
شکل ۱۰ مقایسهٔ نمودار آزمایشگاهی شمع تحت اثر بار جانبی با نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر



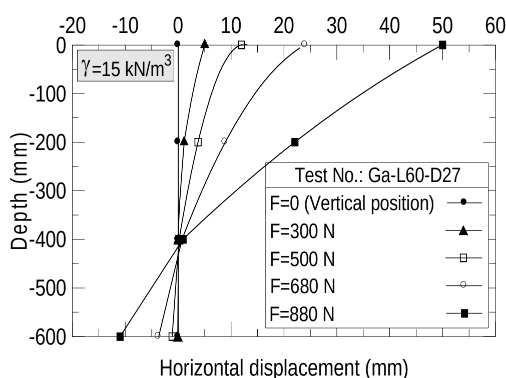
شکل ۱۱ رفتار شمع‌های آلومینیومی در خاک با وزن مخصوص ۱۵ kN/m³

رفتار شمع‌های بلند. شمع بلند تحت اثر بار جانبی در نقطه‌ای در طول شمع تشکیل مفصل می‌دهد. قسمت بالای نقطهٔ مفصل جابه‌جایی افقی خواهد داشت و قسمت پایین نقطهٔ مفصل در خاک به‌طور ثابت باقی خواهد ماند. اگر طولی که در داخل خاک ثابت باقیمی ماند به اصطلاح طول گیرداری نامیده شود، افزایش طول شمع در هر شمع بلندی که طول گیرداری آن تأمین شده باشد تأثیری در رفتار آن شمع ندارد. شمع‌های بلند آلمینیومی در خاک با وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب تحت اثر بار جانبی قرار گرفته‌اند که نتایج آن در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود.

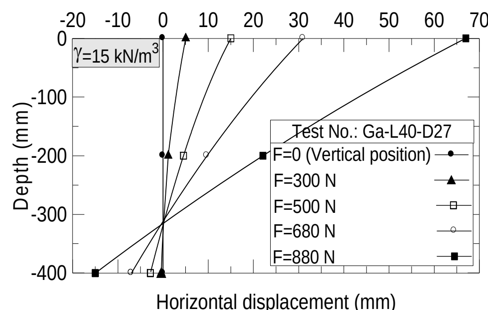
رفتار شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر کاملا مشابه با رفتار شمع با طول ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در واقع طول گیرداری لازم در شمع با طول مدفون ۶۰۰ میلی‌متر تأمین شده است و با افزایش طول آن به ۸۰۰ میلی‌متر تغییری در رفتار شمع حاصل نمی‌شود. شمع با طول ۴۰۰ میلی‌متر تحت اثر بار جانبی ابتدا خمیده شده و سپس تشکیل مفصل داده است. برای درک بهتر رفتار شمع بلند، تغییر شکل شمع‌های گالوانیزه و آلومینیومی در اعماق خاک با طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۷ و ۲۴/۸ میلی‌متری در اشکال (۱۲) تا (۱۵) به‌عنوان نمونه در چهار مرحله از بار گذاری نمایش داده شده است. رفتار شمع گالوانیزه‌ای با طول ۴۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر که در اشکال (۱۳) و (۱۴) قابل مشاهده است، به شکل شمع کوتاه می‌باشد. با توجه به اشکال (۱۵) و (۱۶) ملاحظه می‌شود رفتار دو شمع آلومینیومی با طول‌های ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر تقریباً یکی می‌باشد و شمع آلومینیومی دارای طول ۴۰۰ میلی‌متر که در شکل (۱۷) نمایش داده شده است تحت اثر بار جانبی ابتدا کمی خمیده شده است و سپس شروع به دوران نموده است.



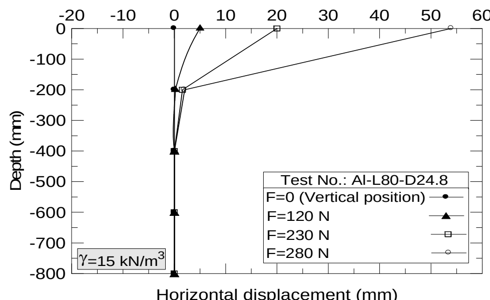
شکل ۱۲ جابه‌جایی افقی شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت



شکل ۱۳ جابه‌جایی افقی شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت

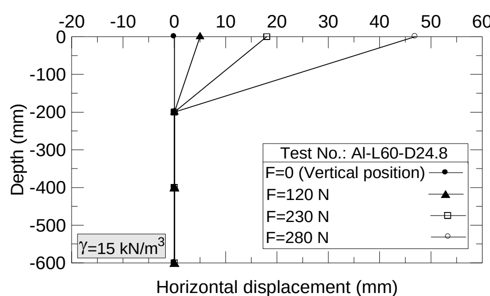


شکل ١٤ جابه‌جایی افقی شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت

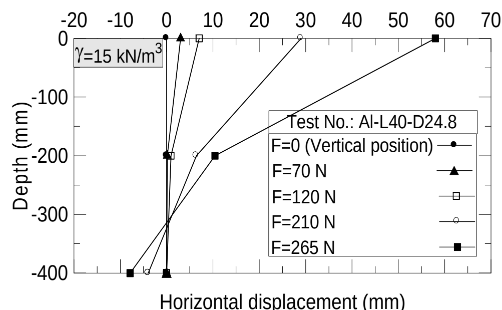


شکل ١٥ جابه‌جایی افقی شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت

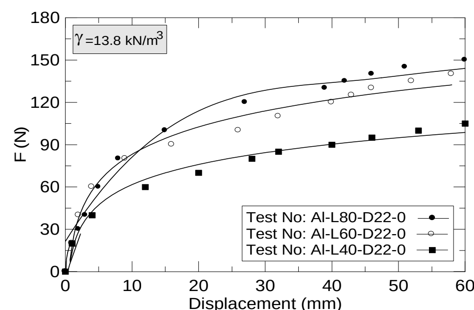
در شکل (١٨) رفتار شمع‌های آلمینیومی در خاک با وزن مخصوص ١٣/٨ کیلونیوتن بر متر مکعب تحت اثر بار جانبی مشاهده می‌شود. رفتار شمع با طول مدفون ۸۰۰ میلی‌متر همانند شمع با طول مدفون ٦۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در شکل (١٩) دو شمع بلند در شرایط یکسان تحت اثر بار جانبی قرار گرفته‌اند که ملاحظه می‌شود، برای یک جابه‌جایی افقی مشخص، شمع با قطر بیشتر نیاز به نیروی جانبی بیشتری دارد.



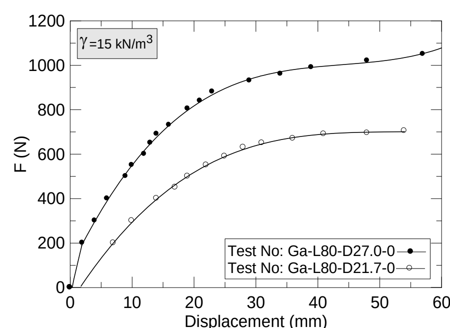
شکل ١٦ جابه‌جایی افقی شمع با طول مدفون ٦۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت



شکل ١٧ جابه‌جایی افقی شمع با طول مدفون ٤۰۰ میلی‌متر در اعماق متفاوت



شکل ١٨ رفتار شمع‌های آلمینیومی در خاک با وزن مخصوص ١٣/٨ kN/m^3



شکل ١٩ رفتار شمع‌های گالوانیزه در خاک با وزن مخصوص ١٥ kN/m^3

مکان تشکیل مفصل در شمع‌های بلند. با مراجعه به جدول (٦) ملاحظه می‌شود شمع آلمینیومی با طول ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ٢٤/٨ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ١٥ کیلونیوتن بر متر مکعب در فاصله ١٤۰ میلی‌متری نسبت به سطح خاک، تشکیل مفصل داده اما شمع گالوانیزه ای با همان طول و قطر ٢١/٧ در فاصله

۲۴۰ میلی‌متری نسبت به سطح خاک تشکیل مفصل داده است. هم‌چنین شمع گالوانیزه‌ای با قطر بیشتر در فاصلهٔ ۲۵۰ میلی‌متری نسبت به سطح خاک تشکیل مفصل داده است که این روند نشان می‌دهد در شرایط یکسان با افزایش سختی شمع، نقطهٔ مفصلی شدن نسبت به سطح خاک افزایش می‌یابد. شمع با طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متری نیز به‌دلیل عدم تأمین طول گیرداری لازم شروع به دوران نموده است. لازم به توضیح است که شمع با طول مدفون ۴۰۰ میلی‌متر در خاک با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب تحت اثر نیروی جانبی مقدار انحنای بسیار کمی نسبت به بقیه شمع‌ها داشته است. این شمع هنوز به‌طور کامل تشکیل مفصل نداده که شروع به دوران نموده‌است.

نتایج پیش‌بینی رفتار شمع‌ها. در بین شمع‌های مورد آزمایش چهار شمع با کدهای Ga-L40-D21.7، Ga-L60-D21.7، Ga-L40-D27 و Ga-L60-D27 رفتار شمع کوتاه و بقیه رفتار شمع بلند از خود نشان داده‌اند. با در نظر گرفتن جدول (۱) و جدول (۷) ملاحظه می‌شود در میان روابط ارائه شده برای پیش‌بینی رفتار شمع‌ها، رابطهٔ برامز نسبت به سایر روابط پیشنهاد شده، رفتار شمع‌ها را بهتر پیش‌بینی نموده است. در رابطهٔ برامز در صورتی که نسبت طول شمع مدفون به طول مشخص کوچک‌تر از عدد دو و یا بزرگ‌تر از چهار باشد شمع به‌ترتیب کوتاه و بلند می‌باشد و در صورتی که بین دو و چهار باشد ممکن است شمع رفتار بلند یا کوتاه داشته باشد.

جدول ٦ نقطهٔ مفصل شمع نسبت به سطح خاک تحت اثر بار جانبی

Test No.	وزن مخصوص خاک (kN/m^3)	نقطهٔ مفصلی شدن نسبت به سطح خاک (mm)	توضیحات
Al-L40-D22	13.8	100	نقطهٔ دوران نسبت به سطح خاک ۳۱۰ میلی‌متر
Al-L60-D22		165	
Al-L80-D22		170	
Al-L40-D24.8	15	150	نقطهٔ دوران نسبت به سطح خاک ۳۰۰ میلی‌متر
Al-L60-D24.8		145	
Al-L80-D24.8		140	
Ga-L80-21.7	15	240	
Ga-L80-D27	15	250	

جدول ۷ پیش‌بینی رفتار شمع‌ها

Label	γ	Ep	Es	Broms	Poulos & Davis	Bierschwale	Dobry	Davies & Budhu	Poulos & Hull
	kN/m^3	GPa	MPa	L/T	Kr	L/B	SH	$1.5BK^{0.36}$	Lc
Ga-L40-D21.7	15	196	40	1.94	0.0013	18	2.19	0.7	0.34
Ga-L60-D21.7	15	196	40	3.15	0.0003	27	3.29	0.7	0.34
Ga-L80-D21.7	15	196	40	4.49	0.0001	36	4.38	0.7	0.34
Ga-L40-D27	15	196	40	1.83	0.0028	14	1.76	0.87	0.41
Ga-L60-D27	15	196	40	3.02	0.0005	22	2.64	0.87	0.41
Ga-L80-D27	15	196	40	4.06	0.0002	29	3.52	0.87	0.41
Al-L40-D22	13.8	68	16.4	2.84	0.001	18	2.5	0.67	0.32
Al-L60-D22	13.8	68	16.4	4.26	0.0002	27	3.37	0.67	0.32
Al-L80-D22	13.8	68	16.4	5.68	0.0001	36	4.5	0.67	0.32
Al-L40-D24.8	15	68	40	2.76	0.0005	16	2.49	0.55	0.26
Al-L60-D24.8	15	68	40	4.14	0.0001	24	3.74	0.55	0.26
Al-L80-D24.8	15	68	40	5.51	0	32	4.99	0.55	0.26

بحث بر روی نتایج

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته و مشاهدهٔ نتایج می‌توان گفت در صورت استفاده از نظریهٔ ضریب واکنش بستر به‌نحوی که مقدار ضریب افقی واکنش بستر ثابت فرض شود برای تغییر شکل‌های اولیه شمع می‌تواند کاربرد داشته باشد (محدودهٔ ابتدای نمودار شکل (۳) که شمع رفتار الاستیک دارد). باید دانست ضریب افقی واکنش بستر نه تنها در عمق خاک بلکه در یک عمق ثابت با توجه به تغییر شکل‌های به‌وجود آمده تغییر پیدا می‌کند. در صورت استفاده از ضریب افقی واکنش بستر متغیر (استفاده از رابطهٔ ۹) نتایج هم‌خوانی بهتری دارد و به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود. در نظریهٔ الاستیک نیز هرچه اطلاعات دقیق‌تری از شمع و خاک در محل موجود باشد تطبیق بهتری با واقعیت خواهد داشت.

هنگامی که شمع تحت اثر بار جانبی قرار می‌گیرد (شکل ٤)، اگر نیروی جانبی به‌طور پیوسته افزایش یابد زمانی می‌رسد که با کوچک‌ترین افزایش نیرو، شمع جابه‌جایی زیادی از خود نشان می‌دهد. این موضوع در نمودارهای حداکثر ضریب افقی واکنش بستر مشاهده نمی‌شود. نمودارهای حداکثر ضریب افقی واکنش بستر تا جابه‌جایی افقی زیادی تا حد دو برابر قطر شمع در مقابل نمودار آزمایشگاهی تطابق خوبی از خود نشان می‌دهند و می‌توان از آنها در پیش‌بینی حداکثر ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی استفاده نمود.

با توجه به نتایج و مقایسه‌های انجام شده می‌توان گفت برای پیش‌بینی رفتار شمع بلند تحت اثر بار جانبی در صورتی که اطلاعات دقیقی از خاک به‌ویژه ضریب افقی واکنش بستر موجود باشد، روش ضریب افقی واکنش بستر با متغیر در نظر گرفتن ضریب افقی واکنش بستر بهترین روش در میان روش‌های نام‌برده است. در صورتی که اطلاعات کلی از خاک و شمع موجود باشد، می‌توان با توجه به داده‌های موجود از هر یک از روش‌های الاستیک و حداکثر ضریب افقی واکنش بستر استفاده نمود. روش حداکثر ضریب افقی واکنش بستر محدوده‌ای را مشخص می‌کند و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد در اکثر مواقع تقریباً نمودار جابه‌جایی افقی شمع در این محدوده قرار می‌گیرد. لذا این روش نسبت به روش الاستیک بهتر به نظر می‌رسد.

رفتار شمع‌های بلند با طول های متفاوت و سایر مشخصات یکسان در صورتی که طول گیرداری آنها تأمین شده باشد، یکسان است. در نیروهای کوچک جابه‌جایی این شمع‌ها نزدیک به هم می‌باشد. در ابتدای نمودار مشخص می‌باشد که تمام نمودارها تقریباً بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند (شکل ۱۱) سپس شمع کوتاه‌تر به‌علت عدم تأمین طول گیرداری لازم، شروع به دوران کرده است. در واقع نیروی لازم برای جابه‌جا نمودن خاک اطراف کمتر از نیروی لازم برای ادامه خم نمودن شمع بوده است. با در نظر گرفتن نمودارها و جابه‌جایی‌هایی که در عمق خاک صورت گرفته می‌توان گفت که طول مدفون لازم برای این شمع‌ها بیشتر از ٤۰۰ میلی‌متر و کمتر از ٦۰۰ میلی‌متر می‌باشد که افزایش طول شمع بیشتر از آن، تأثیری بر رفتار شمع ندارد. در صورت تأمین طول گیرداری شمع افزایش طول شمع تأثیری در رفتار شمع ندارد.

نتیجه گیری

۱. در میان روابط ارائه شده برای پیش‌بینی رفتار شمع به لحاظ کوتاه یا بلند بودن، رابطهٔ برامز نسبت به سایر روابط از دقت بیشتری برخوردار است.
۲. در میان روش‌های نام‌برده، نظریهٔ حداکثر ضریب افقی واکنش بستر نسبت به سایر نظریه‌ها برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع‌های بلند بهتر می‌باشد. البته با داشتن مقدار دقیق ضریب افقی واکنش بستر می‌توان از نظریهٔ ضریب افقی واکنش بستر نیز استفاده نمود.
۳. افزایش قطر در شمع‌های بلند باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی می‌شود.
٤. افزایش طول شمع در شمع‌های بلندی که طول گیرداری آنها تأمین شده است، هیچ تأثیری در

ظرفیت باربری شمع ندارد.

۵. تغییر سختی شمع بلند باعث تغییر فاصلهٔ نقطهٔ مفصلی شدن در طول شمع نسبت به سطح خاک می‌شود. به‌طور کلی با افزایش سختی شمع فاصله نقطهٔ مفصل نسبت به سطح خاک افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Poulos, H.G. and Davis, E.H., "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley and Sons, New York, NY, (1980).
2. Hansen B., J., "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces", Danish Geotech. Institute, Bull, Copenhagen 12, pp. 5-9, (1961).
3. Broms, B., "The Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", *J. Soil Mech. Found*. Div., ASCE, Vol. 90, No. SM2, pp. 27-63, (1964a).
4. Broms, B., "The Lateral Resistance of Piles in Chesive Soils", *J. Soil Mech. Found*. Div., ASCE., Vol. 90, No. SM3, pp. 123-156, (1964b).
5. Petrasovits, G. and Award, A., "Ultimate Lateral Resistance of a Rigid Pile in Cohesionless Soil", Proc., *5th European Conf. on SMFE, Madrid*, Vol. 3, pp. 407-412, (1972).
6. Meyerhof, G. G., Mathur, S. K. and Valsangkar, A. J., "Lateral Resistance and Deflection of Rigid Wall and Piles in Layered Soils", *Canadian Geotech. J*., Vol. 18, pp. 159-70, (1981).
7. Meyerhof, G. G., "Behaviour of Pile Foundations Under Special Loading Conditions", *Canadian Geotech. J*., Vol. 32, pp. 204-22, (1995).
8. Prasad, V.S.N. and Chari, T. R., "Lateral Capacity of Model Rigid Piles in Cohesionless Soils", Japanese Geotechnical Society, Vol. 39, No. 2, pp. 21-29, (1999).
9. Reese, L. C. and Matlock, H., "Non-Dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth", *8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Austin, TX, pp. 1-41, (1956).
10. Kumar, S., Lalvani, L. and Omar, M., "Nonlinear Response of Single Piles in Sand Subjected to Lateral Loads Using Khmax Approach", *Geotechnical and Geological Engineering Journal*, Springer, Vol. 24, pp. 163-181.(2006).
11. Christensen, N. H., "Model Tests with Transversally Loaded Rigid Piles in Sand", Danish Geotech. Ins., Bull. Copenhagen, No. 12, pp. 10-16, (1961).
12. Zhang, L., Silva, F. and Grismala, R., "Ultimate Lateral Resistance to Piles in Cohesionless Soils", *J.Geotech. Geoenviron.* ASCE, Vol.131, pp. 78-83, (2005).
13. Murugan, M., Natarajan, C. and Muthukkumaran, K., "Behavior of Laterally Loaded Piles in Cohesionless soils", *J. Earth Science and Engineering*, Vol. 4, No. 6 SPL, pp.104-106, (2011).
14. Boominathan, A., Ayothiraman, R., "An Experimental Study on Static and Dynamic Bending

Behavior of Piles in Soft Clay", *Geotechnical and Geological Engineering*, Springer, Vol. 25, pp. 177-189, (2007).

15. Bierschwale. M., Coyle. H. and Bartowkewitz, R., "Lateral Load Tests on Drilled Shafts Founded in Clay", Drilled Piers Caissons ASCE, pp. 98-113, (1981).
16. Dobry, R., Vicente, E., O'Rourke and Roesset, JM., "Horizontal Stiffness and Damping of Single piles", *J. Geotech. Eng Div ASCE*, Vol. 108, pp. 439-459, (1982).
17. Davies, T. and Budhu, M., "Nonlinear Analysis of Laterally Loaded Piles in Heavily Over Consolidated Clay", Geotechnique. Vol. 36, pp. 527-538, (1986).
18. Poulos, H. G. and Hull, T., "The Role of Analytical Geo-mechanics Current Principles and Practices", ASCE, Vol. 2, pp. 1578-1606, (1989).
19. Terzaghi, K., "Evaluation of coefficient of subgrade reaction", *Geotechnique*, Vol. 5, pp. 297-326, (1955).
20. Seed, H.B and Idriss, I M " Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses", Report EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (1970).
21. Mwindo, J.M., "Strain Dependent Soil Modulus of Horizontal Subgrade Reaction", MS Thesis, University of Missonri, Rolla, Mo, (1992).
22. Kumar, S., "Non-Linear Load Deflection Prediction of Single Piles in Sand Using a Subgrade Reaction Approach", MS Thesis, University of Missouri, Rolla, MO, (1993).
23. Prakash, S., and Kumar, S., "Nonlinear Lateral Pile Deflection Prediction in Sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 2,pp. 130–138, (1996).
24. Blaney, G. W. and O'Neill, M. W., "Measured Lateral Response of Mass on Single Pile in Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, No.11,pp. 126–1342, (1986).
25. Movahedifar, M. and Bolouri-Bazaz, J., "An Estimation of Passive Pressure Against Integral Bridge Abutments Considering Arching Effects ", ACTA Geotechnica Slovenica., Vol. 10, No. 1, pp. 19-31,(2013).

۲۶. کشاورز، جواد " بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در خاک ماسه‌ای "، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۱).